

ных динамических режимов и выбрать рациональный вариант, отвечающий положениям энерго – и ресурсосбережения.

Список использованных источников

1. Ратников В.Ф. Теплопоглощение стенками при периодической работе печей / В.Ф.Ратников // Известия вузов. Черная металлургия. 1962. №2. – С. 153–162.
2. Зобнин Б.Ф. Аккумуляция тепла при несимметричных периодических колебаниях температуры / Б.Ф. Зобнин // Кузнечно-штамповочное производство. 1965. №7. – С.37– 44.
3. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник / А.М. Бакластов, В.М. Бродянский, Б.П. Голубев [и др.] // Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 532 с.
4. Лымбина Л.Е. Изменение температуры стенки воздушной фурмы при контакте с жидким металлом / Л.Е. Лымбина, Ю.Г. Ярошенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1986. №10. – С. 103–107.
5. Лымбина Л.Е. Перенос тепла через стенку воздушной фурмы в нестационарном режиме / Л.Е. Лымбина, Ю.Г. Ярошенко // Известия вузов. Черная металлургия. 1986. № 4. – С. 112–115.
6. Торопов Е.Е. Математическое моделирование нестационарных процессов теплопереноса в ограждениях тепловых агрегатов / Е.Е. Торопов. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2007. – 162 с.
7. Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования / Г. Дёч. – М.: Наука, 1971. – 288 с.
8. Телегин А.С. Тепломассоперенос: учеб. для вузов / А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко; под. ред. Ю.Г. Ярошенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Академкнига, 2002. – 455 с.
9. Теплопередача через стенку в динамическом режиме / Е.В. Торопов, Л.Е. Лымбина, Е.Е. Торопов, Ю.Г. Ярошенко // Творческое наследие Б.И.Китаева: труды Международной науч.-практ. конф. 11-14 февраля 2009 г. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2009. – С. 355–358.
10. Корн Г.А. Справочник по математике для научных работников и инженеров: определения, теоремы, формулы / Г.А. Корн, Т.М. Корн; под общ. ред. И.Г. Арамановича. – Изд. 5-е. – М.: Наука, 1984. – 832 с.

УДК 624.9

Р. Р. Хасанов, Д. А. Данилова, Г. И. Худякова

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ОСОБЕННОСТИ КОНВЕРСИИ КОКСОВОГО ОСТАТКА ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Аннотация

В данной работе был приведен анализ параметров конверсии твердых топлив таких как: торф, бурый уголь, кузнецкий уголь и антрацит, с различными характеристиками (влажность, выход летучих, зольность). Проанализированы и рассчитаны параметры конверсии данных топлив. Описаны основные топлива, применяемые в металлургии, процесс их подготовки и коксования. Рассмотрена возможность применения коксовых остатков торфа, бурого угля, кузнецкого угля, антрацита в металлургическом процессе. Рассчитаны скорости конверсии в зависимости от времени и степени выгорания образца в процессе конверсии топлива. Построены графики скорости убыли массы топлив в зависимости от параметров. Результаты расчетов конверсии сведены в таблицу.

Ключевые слова: древесина, бурый уголь, кузнецкий уголь, антрацит, конверсия, кокс, энергия активации, металлургия, горение.

Abstract

In this paper the conversion parameters analysis of solid fuels such as peat, lignite, Kuznetsk coal and anthracite with a different characteristics (moisture content, the yield of volatile, ash content) were presented. The parameters of conversion of these fuels have been analyzed and calculated. The main fuels used in metallurgy, the process of their preparation and coking are described. The possibility of using fuel from cokes of peat, brown coal, Kuznetsk coal, anthracite in metallurgy is considered. The conversion rates are calculated as a function of process time and burnup degree of the sample during fuel conversion. The diagrams of the fuel mass loss rate are plotted depending on the parameters. The results of the conversion calculations are summarized in the table.

Keywords: wood, lignite, Kuznetsk coal, anthracite, conversion, coke, activation energy, metallurgy, combustion.

Использование древесного угля в качестве твёрдого топлива в металлургии известно давно, древесный уголь на протяжении столетий был основным сырьём для металлургического производства. В середине XVIII века англичане, испытывая недостаток лесных угодий, придумали технологию использования каменного угля для выплавки металла. Спад потребления древесного угля в мировой металлургии активизировался в 80-х годах XIX века из-за его замещения коксом, давления органов экологического контроля и истощения запасов лесов. Решающим фактором стала ценовая конкуренция, так чугун, приготовленный с использованием кокса угля, на мировом рынке стал гораздо дешевле.

Однако, пользуясь древесным углем, невозможно было удовлетворить потребности промышленности в металле, так как это обратило бы земной шар в безлесную пустыню и древесный уголь имел малую прочность. Для производства большого количества металла необходимо было строить доменные печи больших размеров, но чем выше доменная печь, тем больше столб руды, флюсов, угля, тем большая нагрузка приходится на кусочки кокса. Не выдерживая нагрузки, он крошится, образовавшаяся при этом угольная пыль набивается между кусками руды. Газы не могут преодолеть сопротивление столба шихты, плавка замедляется, а то и прекращается полностью. Хрупкость, недостаточная прочность древесного угля не позволяла сооружать большие домны, для этого необходим был более прочный углеродистый материал.

Оценки объёма мирового производства древесного угля значительно разнятся – от 9 до 23 млн. т в год, так как основная его часть изготавливается на малых мощностях кустарным способом в развивающихся странах. При этом считается, что в металлургию поступает около 20 % этого продукта [1].

В металлургии очень важно, чтобы при высокой температуре кокс или уголь мог избавляться от примесей и образовывать практически чистый углерод. Если нагреть уголь без доступа воздуха до температуры 800–1000 °С – получится каменноугольный кокс. Такой процесс называется "коксованием", и только один тип угля способен добиваться этого - это коксовый уголь. Таким образом, когда встает вопрос по поводу того, что такое металлургический уголь - подразумевается, что речь идет о коксовом угле.

Коксовый каменный уголь представляет собой камни абсолютно различных размеров и цветов: от блестяще-серого до матово-черного или серого цветов. После процесса коксования каменных углей получается до 78 % этого продукта.

Коксование проходит в три этапа:

1. Подготовка к коксованию. На данном этапе происходит очищение исходной массы угля от минеральных примесей, а затем измельчение угля до зерен диаметром 3 мм. Далее смешиваются различные сорта угля, и полученная масса (шихта) просушивается.

2. Непосредственно процесс коксования. Полученную массу погружают в специальную печь. Стены печи выполнены из огнезащитного кирпича и раскаляются продуктами сгорания некоторых газов, в том числе коксового, а также их смесей. Печь нагревается в течение 15

часов при температуре от 900 до 1500 °С. Полученный продукт (кокс) выталкивают в железнодорожные вагоны специальными устройствами, кокс охлаждается непосредственно в них с помощью воды или с помощью инертного газа.

3. Газосмесь, образующаяся при сгорании кокса, выделяется через специальное устройство – газосборник для последующей обработки. Газовые продукты разделяются за счет добавления в смесь распыленной воды (около 75 °С). Смесь разделяется на смолы, а также парогазовые остатки. Парогазовые остатки фильтруются, из них получают 14-15 % от начальной массы угля коксового газа, который затем применяется для нагрева печи [2].

Каменноугольный кокс используется для нескольких целей, основная – выплавка металлов на металлургических заводах. Так, каменноугольный кокс применяется при изготовлении чугуна, при восстановлении железной руды, его используют в качестве разрыхлителя для различных шихт. Кроме того, металлургический уголь используют в качестве топлива на литейном производстве, а также в быту.

Однако истощение запасов качественного топлива приводит к необходимости поиска альтернативного топлива для процесса плавки металлов. Были проанализированы и рассчитаны параметры конверсии четырех твердых топлив. Важным моментом при расчете является задача подбора физико-математической модели процесса конверсии топлива. Независимо от типа исследуемого топлива, параметров эксперимента общее уравнение, описывающее процесс конверсии включает степень конверсии (X), множитель, учитывающий физико-химические свойства частицы и модель превращения частицы $f(X)$, константу скорости $k(T)$, парциальное давление газа-реагента p_g , порядок реакции n .

$$\frac{dX}{d\tau} = k(T)f(X)p_g^n = k(T)f'(X)(1 - X) p_g^n. \quad (1)$$

При анализе процесса конверсии главной задачей является выбор модели превращения частицы топлива $f(X)$, наиболее достоверно описывающей характер реагирования. Среди множества моделей для угольных частиц обычно выделяют [3, 4, 5] три основных модели конверсии для анализа взаимодействия газа-реагента и твердых топлив.

1. Модель объемного реагирования (*volumetric model*), называемая так же квазигомогенной, – предполагает протекание реакции во всем объеме частицы при сохранении начального диаметра и изменении плотности и пористости частицы по ходу конверсии.

$$\frac{dX}{d\tau} = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}(1 - X). \quad (2)$$

2. Модель сжимающейся частицы (*grain model*) – предполагает, что реакция протекает на поверхности частицы при постепенном уменьшении диаметра. Данную модель называют так же моделью частицы с невзаимодействующим ядром.

$$\frac{dX}{d\tau} = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}(1 - X)^{2/3}. \quad (3)$$

3. Модель хаотически расположенных пор (*random pore model*) – учитывает внутрипористое реагирование и изменение поверхности реагирования в процессе конверсии за счет объединения соседних пор, в этом случае закон реагирования:

$$\frac{dX}{d\tau} = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}(1 - X)(1 - \psi \cdot \ln(1 - X))^{1/2}. \quad (4)$$

Параметр (ψ) отражает исходную пористую структуру непрореагировавшего образца [5].

Процесс горения частиц протекает в гетерогенном режиме, состоит из стадий, которые фактически частично накладываются одна на другую:

- 1) подсушивание топлива и нагревание до температуры начала выхода летучих веществ;
- 2) выделение летучих веществ, их воспламенение и выгорание;
- 3) нагревание кокса до воспламенения;
- 4) выгорание горючих веществ из кокса.

В предыдущей работе [6] нами были рассчитаны параметры конверсии первой стадии горения – выхода летучих, в данной работе получены и проанализированы параметры кон-

версии коса на основе моделей 1 и 2 (формулы (2), (3)). Начальные параметры исследуемых топлив приведены в таблице 1.

Таблица 1

Начальные параметры исследуемых топлив				
№	Топливо	Влажность ($W, \%$)	Выход летучих ($V, \%$)	Зольность ($A, \%$)
1	Торф	8	57	10
2	Бурый уголь	5	39	34
3	Каменный уголь	3	34	28
4	Антрацит	3	9,5	12

На основе проведенных опытов были полученные следующие результаты.

Определялись параметры воздушной конверсии коксовых остатков, полученных после выхода летучих в инертной среде. Эксперименты проводились на приборе термогравиметрического анализа NETZSCH STA 449F3 [6], определение параметров производилось по скорости убыли массы (рис. 1).

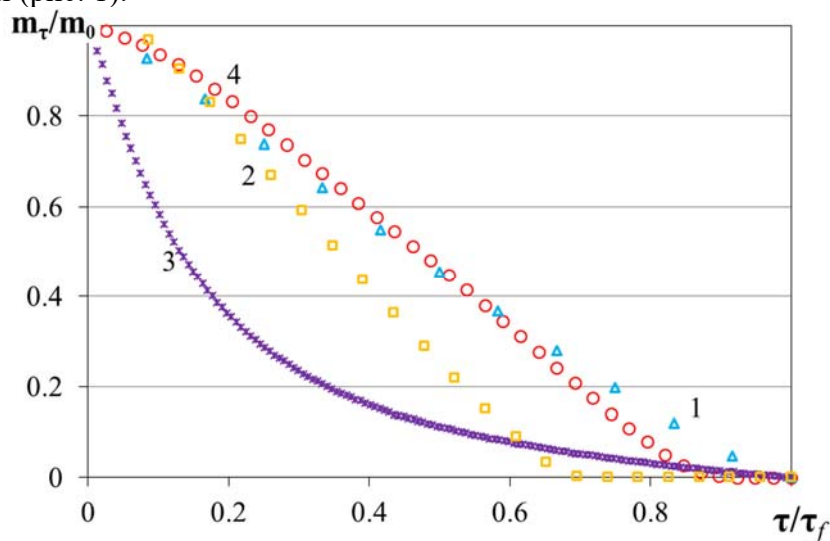


Рис. 1. Скорость убыли массы топлив в зависимости от времени конверсии: 1 – торф, 2 – бурый уголь, 3 – каменный уголь, 4 – антрацит

Также для нахождения энергии активации был построен график зависимости R_τ от X (рис. 2).

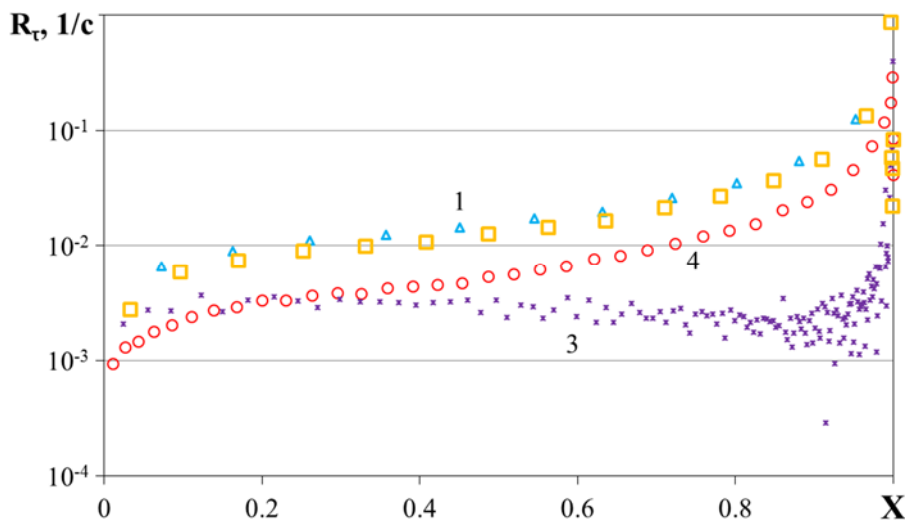


Рис. 2. Зависимость R_τ от X для данных топлив

В результате проведенных расчетов была рассчитана скорость конверсии для всех четырех топлив. В диапазоне $X=0,2-0,6$ наблюдается постоянное значение скорости реагиру-

ния углерода, однако к концу процесса скорость на текущую массу существенно возрастает. Полученные величины сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Полученные результаты по скорости конверсии		
Топливо	при $X = 0,5$	при $X = 0,95$
Торф	0,0171	0,1251
Бурый уголь	0,0127	0,1347
Каменный уголь	0,0033	0,0021
Антрацит	0,0055	0,0456

Конверсия коксового остатка торфа и антрацита и бурого угля проходит по закону модели объемного реагирования, однако бурый уголь во второй половине процесса стремится к модели сжимающегося ядра, в то время как весь процесс конверсии каменного угля стремится к модели сжимающегося ядра.

Список использованных источников

1. Древесноугольная металлургия [Электронный ресурс] URL: <http://metalspace.ru/production-science/economy/991-drevesnougolnaya-metallurgiya.html>.
2. Что такое металлургический уголь [Электронный ресурс] URL: <http://stalevarim.ru/pub/chto-takoe-metallurgicheskiy-ugol-i-chem-on-otlachaetsya-ot-drugi>.
3. Gomez A. et al. A comprehensive experimental procedure for CO₂ coal gasification: Is there really a maximum reaction rate // Applied Energy. 2010. No. 124. pp. 73-81.
4. Miura K., Silveston P. L. Analysis of Gas-Solid Reactions by Use of a Temperature Programmed Reaction Technique // Energy & Fuels. 1989. Vol. 3. pp. 243-249.
5. Ishida M., Wen C. Y. Comparison of Kinetic and Diffusional Models for Solid-Gas Reactions // AIChE J. 1968. Vol. 14. pp. 311-317.
6. Хасанов Р.Р., Данилова Д.А., Худякова Г.И. Особенности выхода летучих твердых топлив // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Материалы всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Екатеринбург, 2016 г.).

УДК 662.76

Д. С. Худяков, П. С. Филиппов, С. И. Гордеев, Е. И. Левин

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УЗЛА УДАЛЕНИЯ CO₂ НА ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ПГУ–ВЦГ

Аннотация

В данной работе рассматривается влияние наличия *shift*-реактора и узла удаления CO₂ (CCS) из синтез-газа (технология *pre-combustion*) на термический КПД перспективной парогазовой установки с внутрицикловой газификацией твёрдого топлива (ПГУ–ВЦГ). Проведен анализ литературных источников по влиянию CCS на термический КПД трёх кислородных ПГУ–ВЦГ. Представлено расчетное влияние степени интеграции CCS в схему демонстрационной ПГУ–ВЦГ на состав сжигаемого газового топлива. Приводится принцип работы *shift*-реактора. Рассматриваются различные типы катализаторов, используемых в *shift*-реакторе. Проанализировано влияние CCS на экономические и экологические показатели ПГУ–ВЦГ. Проведен анализ схем перспективной воздушной ПГУ–ВЦГ с узлом CCS и без не-